**Семенов, Эдуард Валерьевич. Исследование нелинейности преобразования сверхширокополосных сигналов : диссертация ... доктора технических наук : 05.12.04 / Семенов Эдуард Валерьевич; [Место защиты: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники].- Томск, 2012.- 248 с.: ил. РГБ ОД, 71 13-5/57**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

**05201251900**

Семенов Эдуард Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ**

Специальность

1. - радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Диссертация

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Малютин Н.Д.

Томск - 2012

[СОДЕРЖАНИЕ Обозначения и сокращения 7](#bookmark2)

[Введение 12](#bookmark3)

1 Проблема исследования нелинейных искажений

сверхширокополосных сигналов 28

1. [Исследование нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов 28](#bookmark4)
2. [Анализ гармоник и комбинационных спектральных составляющих 30](#bookmark6)
3. [Методы наблюдения за локальными нулями спектра 30](#bookmark7)
4. [Анализ насыщения и амплитудно-фазовой конверсии 30](#bookmark8)
5. [Методы, подразумевающие нахождение разности отклика объекта и тестового сигнала 31](#bookmark9)
6. [Методы, включающие построение модели исследуемого объекта 32](#bookmark11)
7. [Технические решения для фазовой обработки сигналов и их недостатки 37](#bookmark13)
8. [С-секция 38](#bookmark14)
9. Фазовый корректор на основе двух отрезков связанных линий .39
10. [Af-секция 40](#bookmark19)
11. [Модифицированная iV-секция 43](#bookmark21)

[1.2.5'Р-секция 46](#bookmark24)

1. [Использование фазовых корректоров в отсутствие согласования с импедансом источника и нагрузки 47](#bookmark26)
2. [Согласование импедансов в сверхширокой полосе частот 48](#bookmark27)
3. [Согласование импедансов в диапазоне частот от нуля до верхней граничной частоты 48](#bookmark28)
4. [Уменьшение локального рассогласования импедансов 50](#bookmark29)
5. [Коррекция нелинейных искажений 53](#bookmark30)
6. Коррекция нелинейных искажений узкополосных сигналов 53
7. [Коррекция нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов 57](#bookmark31)

[1.5 Выводы и формулировка проблемы 59](#bookmark35)

1. [**Методы исследования нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов с применением фазовой обработки 61**](#bookmark36)
   1. Метод исследования нелинейности преобразования сверхширокополосных сигналов с использованием фазовой обработки . 62
   2. [Исследование нелинейности преобразования сигналов при наличии нелинейных искажений тестовых сигналов генератором 70](#bookmark38)
   3. Исследование нелинейности преобразования сигналов приемником. 74
   4. [Исследование нелинейности преобразования сигналов объектом с учетом нелинейных искажений сигналов приемником 78](#bookmark45)
   5. Сопоставление *e\t)* с другими характеристиками нелинейности 79
   6. [Связь характеристики нелинейности є с вольтамперной характеристикой 80](#bookmark48)
   7. Коррекция нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов 85
   8. [Выводы 87](#bookmark52)
2. **Синтез фазовых корректоров с конструктивно-технологическими и функциональными свойствами, необходимыми для фазовой обработки сверхширокополосных сигналов 90**
   1. [Синтез фазового корректора с симметричными входом и выходом (Х-секции) 90](#bookmark53)
      1. [Структурный синтез Х-секции 90](#bookmark54)
      2. [Условия нулевого вносимого ослабления и коэффициент пропускания Х-секции в этом случае 91](#bookmark55)
      3. [Анализ характеристик Х-секции в общем случае 96](#bookmark59)
      4. [Реализации Х-секции с малой длиной перемычек 98](#bookmark60)
      5. [Параметрический синтез Х-секции 98](#bookmark61)
      6. [Х-секция с неуравновешенной связью линий. Минимизация вносимого ослабления 101](#bookmark62)
      7. [Х-секция на основе нерегулярно включенных связанных линий 103](#bookmark63)
   2. [Синтез фазового корректора с несимметричными входом и выходом, не содержащего элементов с сосредоточенными параметрами 107](#bookmark68)
      1. [Влияние отличия коэффициентов связи линий от единицы на характеристики Ж^-секции 110](#bookmark72)
   3. [Выводы 114](#bookmark73)

[**4 Характеристики фазовых корректоров без использования элементов с сосредоточенными параметрами 116**](#bookmark74)

1. [Обобщенная формула для коэффициента пропускания фазовых корректоров с периодическими характеристиками 117](#bookmark75)
2. [Импульсные характеристики фазовых корректоров 120](#bookmark79)
3. [Общие особенности импульсных характеристик фазовых корректоров 120](#bookmark80)
4. [Способы отыскания импульсной характеристики 122](#bookmark83)
5. Импульсные характеристики различных фазовых корректоров 122
6. [Фазочастотные характеристики и характеристики группового времени запаздывания и фазовых корректоров 127](#bookmark89)
7. Характеристики фазовых корректоров в отсутствие согласования с импедансом источника и нагрузки 129
8. Затухание, вносимое фазовым корректором при рассогласовании только по входу или только по выходу 130
9. Групповое время запаздывания, вносимое фазовым корректором при рассогласовании только по входу или только по выходу 133
10. [Чувствительность характеристик фазовых корректоров к отклонению параметров элементов в согласованном включении и при рассогласовании по одной из пар полюсов 134](#bookmark94)
11. [Выводы 135](#bookmark95)
12. [**Согласование импедансов в сверхширокополосных системах с применением неминимально-фазовых цепей 137**](#bookmark96)
    1. Использование неминимально-фазовых цепей для уменьшения локального рассогласования импедансов 137
    2. [Синтез согласующих неминимально-фазовых цепей 142](#bookmark101)
       1. [Вводные замечания 142](#bookmark102)
       2. [Фазовый корректор как прототип согласующей неминимально­фазовой цепи 143](#bookmark103)
       3. Разновидности фазовых корректоров, обыкновенно предпочтительные для использования в качестве прототипов 143
       4. [Множество варьируемых параметров 149](#bookmark106)
       5. [Целевая функция 150](#bookmark107)
    3. [Эффективность согласования импедансов с помощью неминимально­фазовых цепей в сравнении с известным подходом 151](#bookmark108)
    4. [Выводы 155](#bookmark109)
13. **Приложения методов исследования нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов с применением фазовой обработки ...156**
    1. [Экспериментальные исследования преобразования сигналов металлическими объектами 156](#bookmark111)
       1. [Исследование с использованием характеристики нелинейности *e(t)* 156](#bookmark112)
       2. [Сопоставление методов исследования нелинейности, использующих один и несколько тестовых сигналов 161](#bookmark113)
    2. [Экспериментальные исследования нелинейности преобразования сигналов приемниками 166](#bookmark41)
       1. [Выбор фазового корректора, осуществляющего формирование тестовых сигналов 166](#bookmark116)
    3. [Экспериментальные исследования линий передачи, содержащих линейные и нелинейные неоднородности 170](#bookmark119)
    4. [Реализация метода исследования нелинейности преобразования сверхширокополосных сигналов в векторном импульсном измерителе характеристик цепей Р4-И-01 176](#bookmark120)
    5. [Виртуальный нелинейный импульсный измеритель характеристик цепей 182](#bookmark121)
    6. [Выводы 186](#bookmark122)

[**7 Прочие применения фазовой обработки в сверхширокополосных системах 188**](#bookmark123)

1. [Использование Х-секции в качестве неминимально-фазовой цепи при решении задачи согласования трехэлементной нагрузки в диапазоне от О До/в 188](#bookmark124)
2. [Экспериментальное уменьшение локального рассогласования проводной антенны декаметрового диапазона с использованием неминимально-фазовой цепи 189](#bookmark125)
3. [Фазовая коррекция в устройствах приема и регистрации сверхширокополосных сигналов 192](#bookmark126)
4. Фазовая коррекция в цифровых высокоскоростных системах связи 194
5. Выводы 198

[**Заключение 199**](#bookmark129)

[**Список использованных источников 202**](#bookmark130)

Приложение **А.** Документы о внедрении результатов диссертационной работы 235

**ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

4NEC2 - утилита визуализации и оптимизации для программы NEC2. яіь «12, «2Ь «22 - элементы ненормированной матрицы передачи.

ADS (Advanced Design System) - система автоматизированного проектирования радиотехнических цепей компании Agilent Technologies.

AWRDE (AWR Design Environment) - система автоматизированного проектирования радиотехнических цепей компании AWR Corporation, включающая продукты Microwave Office, Visual System Simulator и Analog Office.

С,ь C22 - собственные погонные емкости связанных линий.

*С\2,С2\-* взаимные погонные емкости связанных линий. *d2 -* коэффициент, определяющий уменьшение амплитуды и увеличение длительности сигнала.

DLL (dynamic-link library) - динамически подключаемая библиотека.

*F* - прямое преобразование Фурье.

*F^x -* обратное преобразование Фурье.

*g -* среднее геометрическое расстояние периметра поперечного сечения проводника от самого себя.

*gn* - вносимая постоянная передачи.

*H{f) -* передаточная функция.

*H[x(t)] -* линейный оператор.

*h{t) -* импульсная характеристика объекта.

*hj(-) -* ядро Вольтерра /-той степени.

*hu(t) -* импульсная характеристика измерительного канала приемника. *hx{t)* - импульсная характеристика опорного канала приемника. *fs -* частота следования импульсов.

/в - верхняя граничная частота.

/н - нижняя граничная частота. *i(u) -* вольтамперная характеристика (ВАХ).

*kc* - коэффициент связи связанных линий по емкости. *kL* - коэффициент связи связанных линий по индуктивности. *к -* коэффициент связи связанных линий по емкости и индуктивности, в случае если они одинаковые.

/ - длина отрезка связанных линий.

*L\\, L22 -* собственные погонные индуктивности связанных линий.

*L\2, Ь2\ -* взаимные погонные индуктивности связанных линий. *т —* в зависимости от контекста: волновое число либо коэффициент крутизны фазовой характеристики.

*М-* взаимная индуктивность.

NEC2 (Numerical Electromagnetics Code) - программа для моделирования антенн и электромагнитного отклика металлических структур (вторая версия).

NRZ (Non-Return to Zero) - код «без возвращения к нулю».

PNA-X - семейство векторных анализаторов цепей компании Agilent Technologies, позволяющих определять Х-параметры исследуемого объекта.

\*$2і(/) \_ коэффициент пропускания, соответствующий элемент

нормированной матрицы рассеяния.

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) - семейство программ для моделирования радиотехнических цепей.

*Sx* - нелинейный оператор опорного канала приемника.

*Su -* нелинейный оператор измерительного канала приемника.

Sn - нелинейный оператор одноканального приемника,

регистрирующего как тестовые сигналы, так и отклики на них.

TDR\_N - созданный в рамках настоящей работы виртуальный

нелинейный рефлектометр.

TDT\_N - созданный в рамках настоящей работы виртуальный

нелинейный импульсный измеритель для измерений на проход. *u{t*) - отклик объекта на тестовый сигнал.

*U{*со) - спектр отклика объекта на тестовый сигнал. *v(p*) - полином Гурвица.

- тестовый сигнал. хо(0 - тестовый сигнал с одним или несколькими нулями спектра. *x{l\t) -* сигнал, полученный на z-той итерации Пикара.

Ху(0 - одночастотный тестовый сигнал.

Дсо) - спектр тестового сигнала.

XML (extensible Markup Language) - расширяемый язык разметки. *уе -* ненормированная проводимость для четной волны в связанных линиях.

*у0* - ненормированная проводимость для нечетной волны в связанных линиях.

*Ye —* нормированная к проводимости входной и выходной линий волновая проводимость для четной волны в связанных линиях.

*Ya -* нормированная к проводимости входной и выходной линий волновая проводимость для нечетной волны в связанных линиях.

*z0e -* волновое сопротивление связанных линий при четном возбуждении. *z0o -* волновое сопротивление связанных линий при нечетном возбуждении.

zr - импеданс источника сигнала. zH - импеданс нагрузки.

*гСл -* матрица сопротивлений связанных линий.

(3 - коэффициент нелинейности вольтамперной характеристики.

*Г(р) -* коэффициент отражения.

*e(t) -* характеристика нелинейности.

$

є (*t*) - характеристика нелинейности, допускающая нелинейные искажения сигналов генератором и учитывающая нелинейные искажения сигналов приемником.

єп(0 - характеристика нелинейности преобразования сигналов приемником.

&,(0 - характеристика нелинейности, полученная для токов через объект.

0 - электрическая длина отрезка связанных линий.

0е - электрическая длина отрезка связанных линий при четном возбуждении.

0О - электрическая длина отрезка связанных линий при нечетном возбуждении.

*X* - эквивалентное усиление.

|i - показатель широкополосности.

*п*

(j,0 = 4л х 10 Гн/м - магнитная постоянная.

р - в зависимости от контекста: волновое сопротивление входной и выходной линий четырехполюсника либо характеристическое сопротивление четырехполюсника.

Ро - вещественное сопротивление источника сигнала (входной линии).

рн - вещественное сопротивление нагрузки (выходной линии).

рк - волновое сопротивление кабеля.

т(/) - групповое время запаздывания как функция частоты.

ф(/) ~ фазочастотная характеристика либо собственная фазовая постоянная.

ф(лс) - целевая функция от вектора параметров *х.*

АЦП - аналого-цифровой преобразователь.

АЧХ - амплитудно-частотная характеристика.

ГВЗ - групповое время запаздывания.

ГСПФ - генератор сигналов произвольной формы.

ДНИ - детектор нелинейных искажений.

КНИ - контроллер нелинейных искажений.

КСВ - коэффициент стоячей волны.

КСВФ(/) - значение коэффициента стоячей волны (частотно-зависимое), превышение которого минимизируется.

Jl3 - линия задержки.

MOM - металл-окисел-металл.

ЦПС - цепь постоянного сопротивления.

векторный

исследовать

Р4-И-01 - созданный в рамках настоящей работы

импульсный измеритель характеристик цепей, позволяющий нелинейность преобразования сверхширокополосных сигналов. САПР - система автоматизированного проектирования. СВЧ - сверхвысокочастотный (сигнал, устройство и т.п.). CJ1 - связанные линии.

СШП- сверхширокополосный (сигнал, устройство и т.п.). ФК - фазовый корректор.

ФЧХ - фазочастотная характеристика.

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность работы.** Сверхширокополосные (СШП) сигналы находят применение в системах связи, для исследования характеристик цепей и систем (например, антенных), в рефлектометрии, в радиолокации [1-5], в подповерхностной локации [6] и т.д. Как и в узкополосных системах, весьма важным вопросом является вопрос о том, какие нелинейные искажения вносят сверхширокополосные узлы и устройства в проходящие через них сигналы. Для СШП-систем этот вопрос даже более значим, чем для узкополосных, поскольку в одном диапазоне частот могут одновременно передаваться несколько СШП-сигналов, а сами СШП-сигналы гораздо более многообразны по форме, чем близкие к гармоническим узкополосные сигналы (нелинейные свойства объектов проявляются по-разному при воздействии на них разных сигналов).

Исследование нелинейных искажений сигналов, включающих одну или несколько гармонических составляющих, широко развито в работах

Н.С. Вернигорова, А.А. Горбачева, Г.П. Жигальского, В.Б. Штейншлейгера, Б.М. Богдановича, С.В. Мелихова, Дж. Буссганга, С.А. Мааса, А.Г. Жаркого, В.И. Туева и др. При этом решаются задачи: нелинейной локации [7-11], контроля качества интегральных микросхем [12], резистивных структур [13], контактов [13-14], металлических пленок, используемых для создания коммутационных слоев, резисторов и контактов интегральных микросхем [15], полупроводниковых материалов [16], анализа нелинейных цепей, например, преобразователей частоты [17-18], измерения многомерных передаточных функций нелинейных цепей [19-23].

При получении и использовании так называемых Х-параметров [24-25], активно продвигаемых в последнее время компанией Agilent Technologies в системе автоматизированного проектирования Advanced Design System (ADS) и измерительных приборах серии PNA-X, характеристики объекта полагаются зависящими только от первой гармоники воздействующего на объект сигнала и постоянного смещения. Поэтому Х-параметры адекватны только случая воздействия на объект узкополосными сигналами.

Проблема исследования нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов связана с тем, что такие сигналы, как правило, имеют сплошной спектр и наблюдение комбинационных спектральных составляющих и гармоник в отклике объекта не представляется возможным. Методы, которые позволяют использовать СШП-сигналы в качестве тестовых, существуют, однако им свойственен ряд недостатков.

Так, для рассмотренного И.Ф. Ивановым и B.C. Трофимовым метода [26], включающего нахождение разности отклика объекта и тестового сигнала, требуется, чтобы «эффективная ширина спектра испытательного сигнала не выходила за пределы горизонтальной части амплитудно­частотной характеристики испытуемого устройства».

Для методов, основанных на воздействии на объект случайными сигналами и анализе статистических характеристик отклика [27-28], требуется длительное воздействие на объект. С.А. Лабутиным [29] на основе теории расщепления сигналов, разработанной А.А. Ланнэ [30], предложен метод оценивания искажений сигналов системой, сводящийся к построению такой ее математической модели, которая позволяет по известному входному сигналу рассчитать сигнал искажений. Недостатком данного метода является то, что построение модели осуществляется только по отношению к заранее заданной модели входного сигнала и с учетом специфики искажений сигналов в конкретных преобразователях [31].

Известен также метод, рассмотренный в работах М. Соби и его коллег [32-33], позволяющий по результатам воздействия на объект изменяющегося по амплитуде импульсного сигнала идентифицировать параметры нелинейной модели объекта. Такая модель, однако, включает рекурсивный (либо нерекурсивный) фильтр заданного порядка и поэтому не подходит для случаев, когда сложность передаточной функции объекта заранее не ограничивается. Отыскание характеристик нелинейных объектов рассматривается и в [34-35]. Здесь также требуется задавать модель объекта заранее.

Одним из возможных подходов к определению нелинейных искажений является отыскание ядер Вольтерра, начиная со второго порядка. Однако без значительных трудностей ряд Вольтерра может использоваться только для слабонелинейного режима. Кроме того, чтобы определить больше ядер Вольтерра, необходимо воздействие на объект большим количеством тестовых сигналов, а чем больше проводится тестовых воздействий, тем больше погрешность при обработке результатов экспериментов [36].

**Методы исследований.** Рассмотренный в настоящей работе метод исследования нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов основан на использовании их фазовой обработки. Это обусловлено следующим соображением. Для узкополосных сигналов одним из главных информативных параметров является частота, поэтому задача исследования нелинейных искажений таких сигналов решается с использованием частотно­селективных устройств. Так, например, измерение коэффициента гармоник методом подавления основной частоты [37] включает режекцию первой гармоники линейным заграждающим фильтром. Устройства селекции нелинейных искажений сигналов со сплошным спектром не могут основываться на частотной селекции гармоник или комбинационных спектральных составляющих. В этом случае основное значение приобретает фазовая обработка сигналов, т.е. такая обработка, при которой преобразование сигнала осуществляется главным образом или исключительно за счет фазочастотной характеристики (ФЧХ) устройства обработки.

Решение проблемы исследования нелинейных искажений СШП- сигналов с применением фазовой обработки связано с необходимостью создания научно обоснованных технических решений, которые позволят осуществлять такую обработку. Средства фазовой обработки должны вносить минимальные нелинейные искажения в сигнал и допускать простую реализацию при длительностях обрабатываемых сигналов 0.1... 10 не. Поэтому во многих случаях средства фазовой обработки целесообразно выполнять аналоговыми.

Работы, посвященные аналоговым формирователям сигналов (которые реализуют заданные и амплитудно-частотную, и фазочастотную харак­теристики), достаточно многочисленны [38-45]. Однако основным средством собственно фазовой обработки являются цепи, имеющие равномерную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и нелинейную ФЧХ [46] (фазовые корректоры). Основы синтеза аналоговых фазовых корректоров (ФК) на сосредоточенных элементах заложены в работах Г.Б. Давыдова [47], К.А. Сильвинской, З.И. Голышко [48], И.И. Трифонова [49-50],

В.JT. Авраменко [51]. Однако применение известных фазовых корректоров на элементах с сосредоточенными параметрами [47-51] на ультравысоких и сверхвысоких частотах затруднительно из технологических соображений. В этих диапазонах предпочтительны ФК на основе связанных линий (СЛ) без использования элементов с сосредоточенными параметрами.

В развитие техники фазовой обработки сигналов с использованием цепей с распределенными параметрами значительный вклад внесли Б.М. Шифман [52], В.П. Мещанов [53], Б.А. Беляев [54-55]. В работах П.А. Воробьева [56], Н.Д. Малютина [57], И.М. Вершинина рассматриваются управляемые фазовые корректоры на основе связанных линий. Однако существенным недостатком известных фазовых корректоров без использования элементов с сосредоточенными параметрами является то, что с их помощью нельзя реализовать характеристику группового времени запаздывания (ГВЗ) с максимумом на нулевой частоте. Это существенно ограничивает возможности по формированию и обработке сигналов в рамках рассмотренного метода исследования нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов.

Кроме того, при использовании аналоговых фазовых корректоров большое значение имеет согласование импедансов как на входе корректора, так и на выходе. Для решения задачи согласования широко используются лестничные цепи элементов с сосредоточенными параметрами. Вопросам их синтеза посвящены работы P.M. Фано [58], Д. Юлы [59], Г. Карлина [60], Вай Кайчэня [61], В.А. Малышева [62] и коллектива, возглавляемого Л.И. Бабаком [63-67]. Согласующие цепи на элементах с распределенными параметрами рассмотрены в работах А.Л. Фельдштейна, Л.Р. Явича [68-69], А.А. Яшина [70], Л.И. Бабака. В работах Н.Д. Малютина [71] и А.А. Головкова [72] рассмотрены методы согласования импедансов в диапазоне дискретных значений частот. Не имеет удовлетворительного решения задача уменьшения рассогласования импедансов в окрестности заданной частоты без существен­ного ухудшения согласования во всем остальном диапазоне частот [59]. Рас­смотренная в [59] согласующая цепь (СЦ) содержит только трансформатор. При этом улучшение согласования в заданной области частот сопровождается значительным ухудшением согласования в остальной области частот.

Таким образом, исследование нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов на фоне их сплошного спектра является актуальной научной проблемой.

**Целью работы** является создание и внедрение новых методов и средств исследования нелинейных искажений сверхширокополосных

сигналов с применением фазовой обработки.

**Основные задачи исследования.** Резюмируя изложенное, с учетом поставленной цели перечислим основные задачи исследования.

1. Создание методов селекции нелинейных искажений

сверхширокополосных сигналов объектом с применением фазовой обработки.

1. Расширение возможностей фазовой обработки сигналов

длительностью 0.1... 10 не путем создания фазовых корректоров без использования элементов с сосредоточенными параметрами с максимумом группового времени запаздывания на нулевой частоте.

1. Решение ряда вопросов, связанных с практическим использованием новых фазовых корректоров, а именно: получение аналитических записей АЧХ, ФЧХ и ГВЗ, исследование особенностей импульсных характеристик фазовых корректоров.
2. Изучение вопроса о специфике функционирования фазовых корректоров в режиме рассогласования по одной или обеим парам полюсов и решение актуальных задач по уменьшению рассогласования импедансов в СШП-системах.
3. Экспериментальные исследования особенностей созданных методов и средств с их последующим внедрением в различные устройства, приборы и системы.

**Достоверность** теоретических исследований подтверждена эксперимен­тально. Дополнительно достоверность основных результатов работы аргумен­тируется их апробацией на конференциях и симпозиумах, публикациями в рецензируемых журналах и успешным прохождением экспертизы по существу в процессе патентования изобретений автора настоящей работы.

**Научная новизна** работы состоит в следующем.

1. Установлена возможность наблюдения продуктов нелинейного преобразования сверхширокополосного сигнала на фоне его сплошного спектра при отсутствии априорных сведений о свойствах объекта, преобразующего сигналы, и наперед не заданной форме тестовых сигналов.
2. Показана реализуемость исследования нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов, при котором характеристика нелинейности отражает только собственные нелинейные искажения сигналов приемником, а нелинейные искажения сигналов генератором являются допустимыми.
3. Показано, что возможности по формированию и обработке сигналов для предложенного метода исследования нелинейности преобразования

сигналов расширяются с применением фазовых корректоров с максимумом группового времени запаздывания на нулевой частоте. Продемонстрировано, что такие корректоры реализуемы без использования элементов с сосредоточенными параметрами, а входы и выходы этих корректоров могут быть как симметричными, так и несимметричными.

1. Продемонстрировано, что рассогласование импедансов для фазового корректора является допустимым, но только по одной из пар полюсов (входу или выходу). Показано, что уменьшение рассогласования импедансов в окрестности заданной частоты без существенного ухудшения согласования в остальной области частот обеспечивается цепями второго порядка только неминимально-фазового типа. Установлено, что такие цепи уменьшают и общую мощность сигнала, которая отражается от нагрузки во всем рассматриваемом диапазоне частот, в то время как известная согласующая цепь в виде трансформатора даже увеличивает общую отраженную от нагрузки мощность.
2. Экспериментально установлено, что нелинейность преобразования сверхширокополосных сигналов, как правило, в несколько раз превышает нелинейность преобразования двухчастотного сигнала при сходной интерпретации соответствующих характеристик нелинейности. Продемонстрировано, что при наличии в исследуемом объекте нескольких неоднородностей использование предложенной характеристики нелинейности позволяет локализовать нелинейные неоднородности.

**Практическая значимость работы.**

1. С использованием предложенного способа исследования нелинейности преобразования сигналов объектом могут быть созданы приборы для получения адекватных характеристик нелинейности сверхширокополосных цепей, а также средства для дистанционного зондирования нелинейных объектов, такие как:

- рефлектометры, позволяющие помимо дальности до неоднородности и характера ее импеданса определить нелинейность преобразования ею зондирующих сигналов с выводами о качестве контакта в данной точке и наличии в ней полупроводниковых элементов (прототипами подобного рода устройств может служить уже реализованный по результатам настоящей работы векторный импульсный измеритель характеристик цепей Р4-И-01, акты о внедрении которого приведены в приложении А);

* подповерхностные радиолокаторы с использованием близкого к видеоимпульсному зондирующего сигнала, в которых дополнительно отображается характеристика нелинейности преобразования сигналов объектами;
* металлоискатели с возможностью селекции объектов по нелинейности преобразования ими сигналов.

1. Предложенная характеристика нелинейности может быть использована для коррекции нелинейных искажений сигналов. При этом не требуется задавать наперед модель входного сигнала и модель вносящего искажения объекта.
2. Синтезированные фазовые корректоры с максимумом группового времени запаздывания на нулевой частоте позволяют решать ряд задач по формированию и обработке сверхширокополосных сигналов, например, корректировать ГВЗ фильтров, используемых в цифровых высокоскоростных системах связи.
3. Применение разработанного подхода к синтезу согласующих неминимально-фазовых цепей позволяет существенно понизить коэффициент стоячей волны в сверхширокополосных трактах.

**Реализация результатов работы.**

1. Способ исследования нелинейности преобразования сигналов объектом с применением фазовой обработки реализован в векторном импульсном измерителе характеристик цепей Р4-И-01. Прибор позволяет осуществлять нелинейную рефлектометрию с применением видеоимпульсных тестовых сигналов. В этом отношении аналоги прибора на мировом рынке не известны. Мелкосерийное производство прибора налажено ООО «НПФ Сибтроника» (г. Томск) [73]. С этой фирмой, а также с

ООО «Компания промышленная электроника» (г. Томск) заключены лицензионные договоры (неисключительные лицензии) о предоставлении права использования соответствующих патентов. Предложение к продаже и продажа прибора осуществляются также ООО «Призм» (г. Красноярск).

Работы по созданию прибора поддерживались в рамках следующих грантов и договоров:

* гранта Президента Российской Федерации № МК-1702.2004.8 на проведение научных исследований по теме «Исследование нелинейных свойств объектов с применением сверхширокополосных тестовых сигналов»;
* государственного контракта № 102 от 20 сентября 2005 г. между Администрацией Томской области и Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» на выполнение научно-исследовательской работы по теме «Универсальный цифровой комплекс для измерения импульсных и частотных характеристик устройств и телекоммуникационных систем в диапазоне от 0 до 1000 МГц»;
* договора № 257 от 27 июня 2006 г. о предоставлении субсидии победителю конкурсного отбора образовательных учреждений высшего профессионального образования, внедряющих инновационные образовательные программы (мероприятие 2.1.3, *а* программы «Разработка первой очереди программного обеспечения лабораторного оборудования учебно-научных лабораторий» и мероприятие 2.1.3, *б* программы «Разработка второй очереди программного обеспечения лабораторного оборудования учебно-научных лабораторий»).

Прибор используется в научных исследованиях и учебном процессе в нескольких российских вузах: Оренбургском государственном университете, Сибирском федеральном университете (г. Красноярск), Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники; отмечен дипломами Международного конгресса-выставки «Global education - образование без границ» (г. Москва, 2007 г.) и конкурса «Сибирские Афины» 11 Межрегиональной специализированной выставки-ярмарки «Средства и системы безопасности. Антитеррор».

1. Упомянутый способ исследования нелинейности преобразования сигналов объектом используется также при подготовке к производству ООО «НПФ Сибтроника» нелинейного импульсного анализатора цепей. Данная работа поддерживалась Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «Старт» (государственный контракт № 6750р/9492) [74-82].
2. Предложенный способ исследования нелинейности преобразования сигналов объектом используется в проводимой в настоящее время опытно­конструкторской работе по созданию автоматизированной системы контроля информационных магистралей и их компонентов для систем управления и электропитания космических аппаратов (договор № 13.G25.31.0017 от 7.09.2010 между ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (г. Железногорск) и Министерством образования и науки Российской Федерации). Работа проводится в порядке реализации постановления Правительства Российской Федерации № 218. С применением получаемой характеристики нелинейности планируется обнаруживать некачественные контакты, проявляющие нелинейные свойства.

Необходимые для такой работы сведения о достижимой дальности обнаружения нелинейных неоднородностей в линиях передачи и требуемых параметрах зондирующих сигналов получены при выполнении государственного контракта № П453 от 31.07.2009 по федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме «Изучение нелинейного рассеяния объектами сверхширокополосных сигналов и исследование возможности создания на этой основе нелинейных рефлектометров и сенсоров».

1. Созданные по результатам настоящей работы прибор Р4-И-01 с функциями нелинейного рефлектометра и виртуальный нелинейный импульсный измеритель характеристик цепей использованы при выполнении проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 09-08-99041 по теме «Методы и средства диагностики качества нелинейных моделей элементов для СВЧ наноэлектроники при сверхширокополосных и импульсных воздействиях».
2. Способ уменьшения локального рассогласования импедансов с помощью неминимально-фазовых цепей использован в научно­исследовательской работе Государственного межотраслевого научно­технологического центра (ГМНТЦ) «Наука» «Исследование научно­технических принципов и изыскание инженерно-технических решений по созданию широкодиапазонных быстроразворачиваемых антенн ДКМВ диапазона» (шифр «Крюшон», генеральный заказчик - войсковая часть 52686 Министерства обороны Российской Федерации).

Эта работа поддерживалась также по программе «Развитие научного потенциала высшей школы» (2005 г.); тема проекта «Уменьшение

локального рассогласования импедансов в сверхширокополосных системах при помощи неминимально-фазовых фильтров».

Документы, подтверждающие приведенные сведения, приведены в приложении А.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Исследование нелинейности преобразования сигналов со сплошным спектром реализуемо посредством воздействия на исследуемый объект первым тестовым сигналом и вторым тестовым сигналом, являющимся линейным преобразованием первого, при этом в качестве характеристики нелинейности регистрируется разность отклика объекта на первый тестовый сигнал и линейно преобразованного отклика на второй тестовый сигнал, причем второй тестовый сигнал предпочтительно формировать посредством фазовой обработки первого.
2. Если зарегистрировать реально воздействующие на объект первый и второй тестовые сигналы и использовать их при определении характеристики нелинейности, описанной в первом защищаемом положении, то оказываются допустимыми нелинейные искажения тестовых сигналов генератором. При этом возможно применение тестовых сигналов с наперед не заданной формой.
3. Если на фазовый корректор осуществить воздействие двумя тестовыми сигналами разной формы и/или амплитуды, зарегистрировать воздействующие сигналы, а также сигналы-отклики фазового корректора, и эти четыре зарегистрированных сигнала использовать для определения характеристики нелинейности, описанной в первом защищаемом положении, то она будет отражать нелинейность преобразования сигналов только регистрирующим устройством (приемником).
4. Фазовые корректоры с максимумом группового времени запаздывания на нулевой частоте без использования элементов с сосредоточенными параметрами расширяют возможности по формированию и обработке сигналов для метода, описанного в первом защищаемом положении. Такие корректоры реализуемы как для трактов с симметричными входами и выходами устройств, так и с несимметричными.
5. Для уменьшения локального рассогласования импедансов в окрестности заданной частоты без существенного ухудшения согласования в остальной области частот предпочтительны цепи минимально достаточного порядка, а именно второго порядка. При этом коэффициент пропускания цепи должен иметь нуль в правой полуплоскости комплексной частоты, что соответствует цепям неминимально-фазового типа.
6. Нелинейность преобразования сверхширокополосных сигналов, как правило, в несколько раз превышает нелинейность преобразования одно- или двухчастотного сигнала при сходной интерпретации соответствующих характеристик нелинейности, одной из причин чего является то, что в характеристику нелинейности в виде совокупности комбинационных составляющих или гармоник не включаются спектральные составляющие отклика объекта с частотами, совпадающими с частотами тестового сигнала.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы представлялись на следующих конференциях и симпозиумах.

1. XXIII Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред», г. Санкт-Петербург, 2005 г.
2. Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», г. Муром, 2003 г.
3. II научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС», г. Омск, 2008 г.
4. X международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2004 г.
5. 19, 20 и 21 Международных конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, Украина, 2009 г., 2010 г, 2011 г.
6. 112 и 113 съездах AES, Германия, г. Мюнхен, США, г. Лос- Анджелес, 2002 г.
7. 2 Всероссийской научно-технической конференции по проблемам создания перспективной авионики «Авионика-2003», г. Томск, 2003 г.
8. Международных научно-практических конференциях «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2004 г., 2005 г., 2007 г.
9. Международных конференциях «Актуальные проблемы электронного приборостроения», г. Новосибирск, 1998 г., 2000 г.
10. Всероссийской научно-практической конференции, посвященная 40-летию ТУ СУР «Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления», г. Томск, 2002 г.
11. Юбилейной научно-технической конференции по радиоэлектронике, посвященной 50-летию радиотехнического факультета ТУ СУР, г. Томск, 2000 г.
12. 6 Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности», г. Томск, 2004 г.
13. Международном конгрессе-выставке «Global education - образование без границ», г. Москва, 2007 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 42 печатных работы, в том числе: 1 монография, 1 глава в книге (на английском языке), 15 статей в журналах из перечня изданий, в которых должны быть опубликованы результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук, 19 работ, опубликованных в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов, 5 описаний патентов на изобретения и полезные модели. Кроме того, результаты работы отражены в 25 отчетах о научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах.

**Личный вклад автора.** Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично и опубликованы в ряде работ без соавторов [83-93]. Когда приводятся результаты, полученные в соавторстве, роль соавторов оговаривается отдельно. Работы, посвященные приложениям полученных автором результатов, выполнялись большим коллективом коллег автора, аспирантов и студентов. Среди них следует отметить Н.Д. Малютина, А.В. Семенова, А.Г. Лощилова.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, семи разделов, заключения, списка использованных источников, включающего 225 наименований, и приложения. Объем текста работы с приложением составляет 248 страниц, включая 82 рисунка и 1 таблицу.

**Содержание работы.**

Первый раздел посвящен обзору состояния проблемы исследования нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов. Анализируются методы исследования нелинейных искажений и технические решения для фазовой обработки сигналов, составляющей основу используемого подхода к решению названной проблемы. Кроме того, рассматриваются трудности согласования импедансов в сверхширокополосных системах (такое согласование влияет на функционирование аналоговых средств фазовой обработки). Рассматривается также задача коррекции нелинейных искажений.

Во втором разделе рассматривается «базовый» для дальнейшего изложения метод, позволяющий исследовать нелинейность преобразования сигналов со сплошным спектром. Предложена модификация упомянутого метода, допускающая нелинейные искажения сигналов генератором. Обсуждаются вопросы учета влияния нелинейности преобразования сигналов приемником. Дана интерпретация введенной характеристики нелинейности, которая позволяет сравнивать получаемые результаты с результатами исследования нелинейности преобразования сигналов классическими методами. Кроме того, рассматривается частный случай, для которого удается установить взаимосвязь упомянутой характеристики нелинейности с вольтамперной характеристикой исследуемого объекта. Оговорена возможность применения полученной характеристики нелинейности для коррекции нелинейных искажений сигналов объектом.

В третьем разделе синтезированы фазовые корректоры с максимумом ГВЗ на нулевой частоте без использования элементов с сосредоточенными параметрами (как с симметричными, так и с несимметричными входами и выходами).

В четвертом разделе получена обобщенная формула, описывающая коэффициенты пропускания нескольких фазовых корректоров. Это позволяет выполнять их структурную оптимизацию средствами параметрической. Далее рассматриваются общие особенности импульсных характеристик фазовых корректоров; для основных разновидностей фазовых корректоров определены их импульсные характеристики. Изложена методика отыскания фазочастотных характеристик и характеристик группового времени запаздывания фазовых корректоров. Эти характеристики определены для разработанных и основных известных корректоров без использования элементов с сосредоточенными параметрами. Кроме того, рассматриваются характеристики фазовых корректоров в отсутствие согласования с импедансом источника или нагрузки.

В пятом разделе синтезируется согласующее устройство, при использовании которого уменьшение рассогласования импедансов в окрестности заданной частоты не сопровождается значительным ухудшением согласования в остальной области частот. Показано, что решение такой задачи согласования обеспечивается цепями второго порядка только неминимально-фазового типа.

В шестом разделе приведены примеры практических приложений изложенного во втором разделе метода исследования нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов.

В седьмом разделе рассматриваются примеры применения созданных технических решений фазовой обработки сигналов для согласования импедансов в сверхширокоплосных системах и для классических целей - коррекции фазочастотных характеристик.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные результаты работы сводятся к следующему.

Предложен метод исследования нелинейных искажений сверхшироко­полосных сигналов на фоне их сплошного спектра. Применение фазовой обработки при формировании тестовых сигналов обеспечивает лучшее отношение сигнал/шум для получаемой характеристики нелинейности, чём в случае, если тестовые сигналы отличались бы только амплитудой.

Выдвинут ряд предложений по уменьшению влияния нелинейных искажений сигналов генератором и приемником на результаты исследований. Предложен метод исследования нелинейных искажений, при котором допустимы нелинейные искажения тестовых сигналов генератором и возможно применение тестовых сигналов с наперед не заданной формой. Описан подход к исследованию нелинейности преобразования СШП- сигналов только приемником, при котором необходимым элементом измерительного тракта является линейный аналоговый фазовый корректор. Указан признак нелинейности преобразования сигналов объектом при наличии нелинейных искажений сигналов приемником.

Показана возможность использования предложенной характеристики нелинейности для коррекции нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов. При этом не требуется заранее задавать соответствие характеристик корректора ни характеристикам устройства, вносящего искажения, ни параметрам корректируемого сигнала.

К средствам фазовой обработки сигналов, используемым в предложенном методе исследования нелинейных искажений СШП-сигналов, предъявлены (по крайней мере для некоторых случаев) требования малых собственных нелинейных искажений и технологичности при обработке сигналов длительностью 0.1... 10 не. Этим требованиям удовлетворяют аналоговые фазовые корректоры без использования элементов с сосредоточенными параметрами. По результатам обзора установлено, что среди таких корректоров не известны цепи с максимумом группового времени запаздывания на нулевой частоте, что существенно ограничивает возможности по формированию и обработке сигналов в рамках упомянутого метода.

Показано, что фазовые корректоры без использования элементов с сосредоточенными параметрами с максимумом группового времени запаздывания на нулевой частоте реализуемы. Такие корректоры синтезированы как для трактов с симметричными входами и выходами устройств (Х-секция), так и с несимметричными (ACY-секция). Показана возможность выполнять структурную оптимизацию фазовых корректоров средствами параметрической (средства параметрической оптимизации на настоящий момент проработаны гораздо лучше, чем структурной). Получены характеристики синтезированных фазовых корректоров (формулы для импульсных, фазочастотных характеристик и характеристик группового времени запаздывания). Использована оригинальная методика получения ФЧХ, предусматривающая отыскание вначале характеристики группового времени запаздывания, а затем фазочастотной характеристики посредством интегрирования характеристики ГВЗ.

На функционирование аналоговых фазовых корректоров влияет согласование с импедансами источника сигнала и нагрузки. Показано, что рассогласование для фазового корректора является допустимым, но только по одной из пар полюсов (входу или выходу). В связи с этим рассмотрены вопросы согласования импедансов в сверхширокополосных системах. Показано, что уменьшение локального рассогласования импедансов в окрестности заданной частоты без существенного ухудшения согласования в остальной области частот обеспечивается цепями второго порядка только неминимально-фазового типа. Установлено, что такие цепи уменьшают и общую мощность сигнала, которая отражается от нагрузки во всем рассматриваемом диапазоне частот, в то время как известная согласующая цепь в виде трансформатора даже увеличивает общую отраженную от нагрузки мощность. Отмечено, что хорошим начальным приближением при синтезе неминимально-фазовых согласующих цепей является фазовый корректор. Показано, что для уменьшения локального рассогласования импедансов предпочтительны цепи, имеющие максимум группового времени запаздывания на нулевой частоте (такие цепи без использования элементов с сосредоточенными параметрами синтезированы в третьем разделе настоящей работы). Эффективность использования неминимально-фазовых согласующих цепей показана на практическом примере сверхширокополосной антенны декаметрового диапазона длин волн.

Предложенный метод исследования нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов реализован в векторном импульсном измерителе характеристик цепей Р4-И-01. Разработана экспериментальная установка, позволяющая исследовать собственные нелинейные искажения СШП-сигналов устройствами их приема и регистрации. Создан виртуальный нелинейный импульсный измеритель характеристик цепей, позволяющий анализировать нелинейность преобразования сверхширокополосных сигналов устройствами на этапе их проектирования в САПР, а также диагностировать качество используемых и вновь создаваемых нелинейных моделей элементов.

В проведенных экспериментальных исследованиях преобразования сверхширокополосных сигналов различными объектами и устройствами отмечено, что нелинейность преобразования СШП-сигналов в несколько раз превышала нелинейность преобразования одно- и двухчастотного сигнала при сходной интерпретации соответствующих характеристик нелинейности.

Продемонстрировано, что при наличии в исследуемом объекте нескольких неоднородностей использование предложенной характеристики нелинейности позволяет локализовать нелинейные неоднородности.

Сказанное позволяет утверждать, что в работе решена научная проблема исследования нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов на фоне их сплошного спектра.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ источников**

1. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Г. В. Глебович, А. В. Андриянов, Ю. В. Введенский [и др.] ; под ред. Г. В. Глебовича. - М. : Радио и связь, 1984. - 256 с.
2. Кошелев В.И., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Восстановление формы объектов при малоракурсной сверхширокополосной радиолокации // Радиотехника и электроника. - 1999. - Т. 44, № 3. - С. 301-305.
3. Кошелев В.И., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Использование метода генетических функций для восстановления формы объектов в малоракурсной сверхширокополосной радиолокации // Радиотехника и электроника. - 2000. - Т. 45, № 12.-С. 1470-1476.
4. Кошелев В.И., Сарычев В.Т., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Оценивание информационных характеристик радиолокационных объектов при сверхширокополосном зондировании [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники. - 2001. - № 5. - URL: [http://jre.cplire.ru/jre/jun0](http://ire.cplire.rn/jre/junO)1/!/ text.html (дата обращения: 26.05.2011).
5. Якубов В.П., Лосев Д.В., Мальцев А.И. Использование сверхширокополосного излучения для диагностики нелинейностей [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники. - 2000. - № 3. - URL: <http://jre.cplire.rU/jre/marOO/l/text.html>(дата обращения: 26.05.2011).
6. Вопросы подповерхностной радиолокации / А. В. Андриянов, Л. Ю. Астанин, Д. В. Багно [и др.] ; под ред. А. Ю. Гринёва. - М. : Радиотехника, 2005. - 416 с.
7. Вернигоров Н.С. Процесс нелинейного преобразования и рассеяния электромагнитного поля электрически нелинейными объектами // Радиотехника и электроника. - 1997. - Т. 42, № 10. - С. 1181-1185.
8. Вернигоров Н.С., Борисов А.Р., Харин В.Б. К вопросу о применении многочастотного сигнала в нелинейной локации // Радиотехника и электроника. - 1998. - Т. 43, № 1. - С. 63-66.
9. Вернигоров Н.С. Исследование многочастотного зондирования в нелинейной радиолокации для увеличения дальности обнаружения нелинейного объекта и определения его координат // Информост. Радиоэлектроника и телекоммуникации. - 2006. - № 2. - С. 73-80.
10. Нелинейная радиолокация : сборник статей. Ч. 1 / под ред.

А.А. Горбачева, А.П. Колданова, А.А. Потапова, Е.В. Чигина. - М. : Радиотехника, 2005. - 96 с.